C.D.T.
Centre de développement technologique

ÉCOLE
POLYTECHNIQUE

RAPPORT

DÉTERMINATION DES CONTRAINTES DANS LE BÉTON DUES AUX RÉACTIONS ALCALIS-GRANULATS

préparé par

Benoit Durand
Jules Houde
Richard Roux
Gérard Degrange
Alain Blanchette

CONTRACT SERIAL NO. 99234-01-SS
CONTRACT REQUISITION NO. 23440-9-9234
CONTRACTOR: ECOLE POLYTECHNIQUE

Cette étude a été réalisée grâce à une subvention du Centre Canadien de la Technologie des Minéraux et de l'Énergie, Énergie, Mines et Ressources du Canada.

DOSSIER SSC NO.: 048SS.23440-9-9234
CONTRAT No.: 23440-9-9234/01-SS
AUTORITÉ SCIENTIFIQUE À CANMET: Dr. G.G. Carette

37 pp

MICROMEDIA

28 mars 1991

91-04688/

DÉTERMINATION DES CONTRAINTES DANS LE BÉTON DUES AUX RÉACTIONS ALCALIS-GRANULATS

RAPPORT FINAL
SOUMIS À CANMET

AUTEURS

Benoît Durand

Service Technologie des Matériaux, Vice-Présidence Recherche, Hydro-Québec, Institut de Recherche en Électricité du Québec, 1800 montée Ste-Julie, Varennes Québec, Canada, J3X 1S1, tél. 514-652-8324, télécopieur 514-652-8905

Jules Houde
Richard Roux
Gérard Degrange

Département de Génie Civil, École Polytechnique de Montréal, C.P. 0674, Succ. A, Montréal, Québec, Canada, H3C 3A7, tél. 514-340-4800, télécopieur 514-340-4026

Alain Blanchette

Les Laboratoires Ville-Marie inc., 1200, boul. St-Martin Ouest, Laval Québec, Canada, H7S 2E4, tél. 514-384-7970, télécopieur 514-668-5532

Benoît Durand
Benoît Durand
Date: 28/03/91

Jules Houde
Jules Houde
Date: 28/03/91

RÉSUMÉ

Cette étude porte sur le développement d'une méthode de mesure des contraintes générées par les réactions alcalis-granulats et de son application à des barres de mortier et des prismes de béton fabriqués avec deux types de granulats réactifs aux alcalis et un granulat considéré comme non réactif aux alcalis. Une cure accélérée à 80°C dans une solution de NaOH 1N a été utilisée afin d'augmenter les taux de réaction à l'intérieur des échantillons. L'appareillage utilisé pour les essais d'autoconfinement doit être à l'épreuve des vapeurs de soude à haute température qui sont extrêmement corrosives.

Les résultats obtenus, ont confirmé que:

1. Les réactions alcalis-granulats peuvent générer des expansions libres et des contraintes d'autoconfinement importantes, soit plus de 6 MPa en confinement uniaxial après 30 jours à 80°C dans une solution de NaOH 1N.

2. L'utilisation de barres de mortier à 80 °C dans une solution de NaOH 1N permet d'obtenir des résultats d'autoconfinement en peu de temps, comme pour les expansions libres. D'après les résultats obtenus, les granulats qui démontrent le plus d'expansion libre génèrent les plus grandes contraintes.

ABSTRACT

This study was initiated for the development of a method for measuring the stress provoked by the alkali-aggregate reactions and its application to mortar bars and concrete prisms made with two reactive aggregates and one non-reactive aggregate. An accelerated cure at 80°C in a 1N NaOH solution was used in order to increase the rate of reaction into the samples. The apparatus used for this kind of test must be resistant to highly corrosive NaOH vapors.

The results confirms that:

1. Alkali-aggregate reactions can generate important free expansions and stresses i.e. over 6 MPa after 30 days at 80°C in a 1N NaOH solution.

2. The use of mortar bars at 80°C in a 1N NaOH solution allows to obtain stress measurement results as fast as with the free expansion accelerated test. According to the results, the aggregate showing the largest free expansion generates the largest stress.

TABLE DES MATIÈRES

PAGE

RÉSUMÉ i

ABSTRACT ii

1. PRÉSENTATION DE L'ÉTUDE EFFECTUÉE 1

2. REVUE DE LA LITTÉRATURE 2

2.1 Résumé du phénomène des réactions alcalis-granulats 2

2.3 Contraintes théoriques et contraintes générées par le gel seul 3

2.2.1 Contraintes théoriques 3

2.2.2 Contraintes mesurées par expérimentation 4

3. DÉVELOPPEMENT DE L'APPAREILLAGE ET ESSAIS 5

3.1 Bâtis 5

3.2 Description des essais 7

3.1.2 Caractéristiques des mélanges 7

3.1 1 Matériaux 8

4. RÉSULTATS 9

4.1 Barres de mortier 9

4.2 Prismes de béton 9

5. CONCLUSION 10

6. REMERCIEMENTS 10

7. BIBLIOGRAPHIE 10

DÉTERMINATION DES CONTRAINTES DANS LE BÉTON DUES AUX RÉACTIONS ALCALIS-GRANULATS

par
Benoît Durand
Jules Houde
Richard Roux
Gérard Degrange
Alain Blanchette

1. PRÉSENTATION DE L'ÉTUDE EFFECTUÉE

La présente étude porte sur le développement d'une méthode de mesure des contraintes générées par les réactions alcalis-granulats et de son application à des barres de mortier et des prismes de béton fabriqués avec deux types de granulats réactifs aux alcalis et un granulat considéré comme non réactif aux alcalis. Une cure accélérée à 80°C dans une solution de NaOH 1N a été utilisée afin d'augmenter les taux de réaction à l'intérieur des échantillons.

Le premier granulat réactif consiste en un calcaire légèrement siliceux de la région d'Ottawa. Il s'agit du calcaire Spratt dont la réactivité aux alcalis est bien connue au Canada.

Le second granulat réactif est un schiste chloriteux métamorphique (métabasalte) de la région de Sherbrooke qui représente la réaction alcalis-silice/silicates démontrant habituellement une expansion lente et tardive.

Le troisième granulat est une syénite à néphéline de la région de St-Hilaire, Qc. Cette roche est peu ou pas réactive en présence d'alcalis.

La première partie de cette étude a été consacrée à développer une technique fiable de mesure des contraintes générées par l'expansion de barres de mortier confectionnées selon la norme ASTM C 227 (barres de 25 x 25 x 275 mm). Étant donné la cure appliquée, soit

une température de 80°C avec immersion des échantillons dans une solution de NaOH 1N, l'appareillage utilisé doit être très résistant à la corrosion.

Après que le développement de l'appareillage fut terminé et que la technique ait permis d'obtenir des résultats fiables et reproductibles avec un degré de précision satisfaisant, la deuxième partie de l'étude a démarré avec la mise en marche d'essais d'expansion libres et d'autoconfinement de barres de mortier et de prismes de béton. Le schéma du programme des essais d'expansion est présenté à la figure 1.

2.1 Résumé du phénomène des réactions alcalis-granulats

À l'origine des contraintes provoquées par la réaction alcalis-silice ou alcalis-silice/silicates, on retrouve une réaction entre les ions Ca2+, Na+, K+ et OH- de la phase liquide présente dans les pores du béton durci et certaines phases siliceuses ou silicatées de certains types de granulat. En présence de cette solution interstitielle dont le pH peut atteindre des valeurs de 13,0-13,5 (Durand, 1988)(1), ces phases subissent une attaque; de la silice est solubilisée puis recombinée avec les ions Na+ et K+ ainsi que l'ion Ca2+ pour former un gel calco-silico-alcalin. Simultanément ou postérieurement, l'absorption d'eau par ce gel génère des contraintes suffisamment élevées pour faire gonfler et fissurer le béton (Dent-Glasser et Katakoa 1981)(2).

Quant à la réaction alcalis-carbonate (dolomies argileuses), les ions Na+, K+ et OH- réagissent non pas avec des phases siliceuses ou silicatées, mais avec la dolomite et certains minéraux argileux. Il n'y a pas de formation de gel calco-silico-alcalin; il y a plutôt cristallisation d'une série de nouveaux minéraux dont la brucite, Mg(OH)2 (Dolar-Mantuani, 1983)(3). Les expansions associées à ce type de réaction peuvent être très importantes (Swenson et Gillott, 1960, 1964 et Rogers 1986)(4-6).

2.2 Contraintes versus expansion

Actuellement, les essais d'expansion utilisés pour évaluer le potentiel de réactivité aux alcalis des granulats, qu'ils soient accélérés ou non, sont tous basés sur des limites d'expansion libre fixées pour un temps d'essai prédéterminé. Or, dans une structure, les réactions alcalis-granulats provoquent à la fois des expansions et des contraintes car les expansions se produisent en milieu généralement confiné.

Au Canada, il existe au moins deux cas de barrages hydroélectriques qui ont subi des déformations importantes dues aux réactions alcalis-granulats et où des mesures correctives ont dû être apportées. Il s'agit des barrages de Beauharnois, Qc (Albert et Raphaël, 1987)(7) et Mactaquac, N.-B (Thompson, 1990)(8). Dans les deux cas, des coupures transversales ont été effectuées afin de relâcher les contraintes causées par les réactions alcalis-granulats. À Beauharnois, une première coupure effectuée en 1974 s'est refermée instantanément. Plusieurs autres coupures ont été effectuées depuis cette date. Ces deux cas nous font réaliser que les implications économiques des réactions alcalis-granulats peuvent être très importantes.

Ailleurs dans le monde, il existe au moins quatre cas connus de structures en béton où la post-contrainte a été utilisée pour maintenir l'intégrité structurale des structures (deux en Afrique-du-Sud, une au Japon et une au Val de la Mare, Jersey) (Hobbs, 1988)(9). La relation entre les réactions alcalis-granulats et les contraintes associées a été relativement peu étudiée et les données disponibles dans la littérature concernant des mesures en laboratoire ou en chantier de forces ou contraintes attribuables aux réactions alcalis-granulats sont peu abondantes (voir le tableau 1).

2.3 Contraintes théoriques et contraintes générées par le gel seul

2.2.1 Contraintes théoriques

Selon des travaux de Moore (1978)(10), il est possible d'estimer les contraintes potentielles dues aux pressions osmotiques que peut générer le gel produit par les réactions alcalis-silice en utilisant des données physico-chimiques telles la pression de vapeur partielle de l'eau dans le gel et dans la phase interstitielle et le volume molaire partiel de l'eau du gel (Diamond, 1989)(11). D'après Diamond (1989)(11), ces pressions osmotiques se situeraient entre 45 et 140 MPa. Il qualifie ces valeurs d'élevées; en laboratoire, des expériences sur des gels synthétiques de silicate de sodium et quelques gels avec calcium ont indiqué des valeurs maximales de l'ordre de grandeur de 10-11 MPa (Struble et Diamond, 1981)(12).

En fait, dans la pratique, la contrainte maximale à laquelle on peut s'attendre pour un béton affecté par une RAS devrait demeurer modeste et ne pas dépasser de 6 à 7 MPa (Diamond, 1989)(11).

2.2.2 Contraintes mesurées par expérimentation

McGowan et Vivian (1954)(13) ont étudié l'effet de charges statiques sur l'expansion de prismes de mortier contenant de l'opale (opaline silica) comme granulat. Ces travaux indiquent que des contraintes aussi faibles que 0,07, 0,14 et 0,35 MPa étaient suffisantes pour réduire les expansions de façon importante et pour retarder l'apparition des microfissures. Par contre, après avoir retiré les charges à 112 jours, ils ont constaté une récupération importante de l'expansion par rapport aux échantillons de contrôle.

Lors d'un autre essai où une contrainte de 0,35 MPa fut appliquée à 112 jours, ils ont réussi à annuler complètement les expansions. Des travaux similaires effectués par Hobbs (1988)(9) ont révélé des valeurs nettement plus élevées que celles de McGowan et Vivian (1954)(13). En utilisant des bétons avec une teneur optimale d'opale initialement confinés à 2,5 MPa, une contrainte d'autoconfinement de 4 MPa fut développée. Hobbs (9) attribue cette différence à la variation dans les taux d'expansion libre, les contraintes potentielles étant plus élevées lorsque les taux d'expansion libre sont plus grands.

D'autres travaux de Hobbs (1988)(9) indiquent qu'un échantillon de béton soumis à une contrainte de 3,5 MPa pendant 140 jours puis libéré a développé une expansion de 0,18% à 200 jours comparativement à 0,5% pour un échantillon témoin soumis à aucune contrainte. Houde et al., (1987)(14) a effectué des essais de contrainte avec du béton coulé dans des tubes d'acier très rigides. La contrainte enregistrée n'a atteint que 0,24 MPa malgré l'utilisation d'un granulat très réactif (calcaire Spratt). Dans ce cas, l'absence d'humidité aurait nuit à la réaction alcalis-silice.

À Beauharnois (Qc), des essais d'autoconfinement à l'intérieur de trous de forage ont révélé des contraintes d'environ 2 MPa après 1 an et demi (Michel Rivest, comm. pers.)(15). Seno et Kobayashi (1989)(16) ont étudié les contraintes développées par des cylindres de mortier contenant une andésite vitreuse. Ces mortiers, coulés dans des tubes de laiton, ont produit des contraintes atteignant 11,8 MPa à 186 jours. Clergue et Corneille (1989)(17) ont utilisé une cellule triaxiale avec un granulat de calcaire siliceux et ont mesuré des valeurs de 1 MPa à 28 jours.

Wood et al. (1989)(18) ont étudié les contraintes dues aux RAS dans des bétons avec différents pourcentages d'acier d'armature. Dans un cas, avec 3,84% d'armature, la contrainte d'autoconfinement a atteint 13,5 MPa à 75 jours. Dans un autre cas, avec

seulement 0,9% d'armature, il y a eu plastification de l'acier. Cette brève revue de la littérature nous permet de constater les faits suivants:

1. Les expansions libres, c'est-à-dire sans confinement, peuvent atteindre des valeurs importantes en laboratoire (ex.: > 1,5%, Hobbs, 1988)(9). Lors d'essais d'expansion normalisés, des valeurs de l'ordre de grandeur de plus de 0,1% classent généralement les granulats comme étant réactifs.

2. L'application des contraintes peut influencer les expansions jusqu'à les annuler complètement.

3. En laboratoire, les contraintes d'autoconfinement, c'est-à-dire développées par des échantillons confinés mécaniquement à l'aide de bâtis, peuvent atteindre des valeurs de l'ordre de grandeur de 13,5 MPa.

4. Des expansions peuvent se produire si l'on annule les contraintes qui empêchaient la manifestation de ces expansions.

5. En théorie, le gel produit par les réactions alcalis-silice peut générer des pressions osmotiques entre 45 et 140 MPa.

6. En laboratoire, les contraintes développées par les pressions osmotiques dans les gels synthétiques peuvent atteindre 10-11 MPa.

7. Dans les structures, Diamond (1989)(11) estime des valeurs maximales probables de l'ordre de grandeur de 6 à 7 MPa.

3. DÉVELOPPEMENT DE L'APPAREILLAGE ET ESSAIS

3.1 Bâtis

Nous avons opté pour la fabrication de bâtis relativement rigide afin d'obtenir un maximum d'autoconfinement dû aux expansions volumiques reliées aux réactions alcalis-granulats. Les bâtis utilisés pour les barres de mortier de 25 x 25 x 275 mm consistent en 3 plaques reliées par 2 tiges filetés et des écrous en acier inoxydable. Un schéma et une photographie du montage sont présentés aux figures 2 et 8. L'échantillon est placé entre les plaques #1 et #2 et la cellule de charge est placée entre les plaques #2 et #3. Une rotule est placée entre la plaque commune (#2) et la cellule de charge.

Initialement, tout le montage (incluant l'échantillon et la cellule de charge) fût mis en place dans un contenant dans lequel on versait une solution de soude 1N jusqu'au sommet de l'échantillon placé verticalement. Le contenant était scellé et placé dans une étuve maintenue à 80°C.

Les essais effectués en suivant cette procédure se sont déroulés normalement; les contraintes se sont développées de façon continue, sans montée ou baisse soudaine. Les valeurs ont été enregistrées pendant plusieurs semaines et on observa des contraintes importantes pour les deux granulats réactifs. À l'arrêt des essais, il s'est avéré que la contrainte développée par un des échantillons avait dépassée la capacité de sa cellule de charge, soit environ 7-8 MPa, i.e. que la limite d'élasticité de l'aluminium a été dépassée et qu'une plastification s'est produite. D'autre part, certaines cellules, sans avoir atteint leur capacité maximale, indiquaient des déformations résiduelles après que leur charge ait été remise à zéro. Après plusieurs vérifications, il s'est avéré que l'époxyde servant à coller les jauges de déformation sur les tubes d'aluminium est instable en présence de vapeurs fortement basiques. Nous avons effectué de nouveaux essais en tentant de sceller complètement les cellules de charge mais les vapeurs de soudes réussissaient toujours, du moins dans plus de 50% des cas, à pénétrer à travers le scellant utilisé.

Suite à cette seconde série d'essais, nous nous sommes procurés des cellules de charges commerciales qui d'après les spécifications étaient en mesure de très bien résister à de hautes températures. Encore une fois, les vapeurs de soude ont réussi à atteindre les jauges de déformation.

Une troisième série d'essais a donc été entreprise en isolant complètement les cellules de charge des vapeurs de soude en les plaçant à l'extérieur des contenants. La figure 10 présente une photographie du montage placé dans son contenant scellé. Les résultats obtenus se sont révélés fiables à 100%; les cellules fonctionnent très bien après plusieurs essais; leurs calibrations restent inchangées.

Suite à ces résultats encourageants, nous avons entrepris la fabrication des bâtis pour les essais avec prismes de béton de 75 x 100 x 275 mm. Ils consistent en 3 plaques reliées par 4 tiges filetés et des écrous, le tout en acier inoxydable. Des cellules de charge d'une capacité de 50 kN, elles aussi en acier inoxydable, ont été usinées et instrumentées par nos soins. Une photographie d'un montage est présentée à la figure 9.

Les essais avec des prismes de béton n'ont pu être entrepris que tardivement et les résultats actuels confirment que les bétons réagissent beaucoup moins rapidement que les barres de mortier, et ce malgré l'application d'une cure accélérée. Après environ quinze jours de cure, seul le granulat Spratt a repassé le zéro (voir la fig. 5).

3.2 Description des essais

La première phase des essais a consisté à fabriquer des barres de mortier et des prismes de béton. Après une cure de 24 heures en chambre humide à 21 °C, les échantillons ont été démoulés puis placés dans une solution de soude 1N à température ambiante. Par la suite, les contenants étaient placés dans l'étuve maintenue à 80 °C et les mesures initiales étaient prises environ 12 heures plus tard lorsque la température de la solution à l'intérieur des contenant avait atteint 80 °C.

La moitié des échantillons a servi pour les essais d'expansion libre et l'autre moitié a servi pour les essais d'autoconfinement. Pour les essais d'autoconfinement, une contrainte initiale fût appliquée afin de s'assurer que les valeurs ne passent pas du côté négatif dès le début de l'essai. Malgré cette précaution, quelques jours étaient nécessaires avant que les contraintes dues aux réactions alcalis-granulats ne se manifestent. Les expansions libres ont été mesurées à l'air libre à l'aide d'un dilatomètre, tandis que la lecture des charges s'effectuait en place à 80 °C.

La durée de la cure est de 14 jours minimum dans une solution de NaOH 1N à 80 °C. Pour les barres de mortier, nous avons suivi la procédure de l'essai d'expansion accéléré sud-africain (Oberholster et Davies, 1986)(22) qui est en voie de normalisation au Canada. Pour les prismes de béton, nous avons suivi la norme CSA A23.2-14A avec un dosage en ciment de 310 kg/m3 et un rapport E/C de 0,5.

3.1.2 Caractéristiques des mélanges

Nous avons utilisé le mélange spécifié par la norme ASTM C227(23) sauf que le rapport E/C a été fixé à 0,45 au lieu d'ajuster celui-ci en fonction d'un étalement désiré. Pour les prismes de mortier, nous avons utilisé un ciment Portland type 10 dont la teneur en alcalis a été augmentée de 0,92% @1,25 équiv. Na2O par ajout de NaOH à l'eau de gâchage. Les caractéristiques des mélanges et la procédure utilisée pour la confection des échantillons sont décrites aux tableaux 3 et 4.

3.1 1 Matériaux

Granulats:

Nous avons utilisé trois types de granulats provenant de trois sources distinctes:
A) un calcaire légèrement siliceux de la région d'Ottawa, Ontario (calcaire Spratt),
B) un schiste chloriteux de la région de Sherbrooke, Québec,
C) une syénite à néphéline (phonolite) de la région de Saint-Hilaire, Québec.

A) Le calcaire d'Ottawa (Spratt):

Le granulat d'Ottawa est un calcaire à grain fin, très peu argileux et siliceux avec des zones très riches en fossiles. Au point de vue stratigraphique, le calcaire Spratt appartient à la Formation Bobcaygeon de l'Ordovicien Moyen.

Ce granulat est reconnu pour sa réactivité alcaline (Durand, 1988, Bérubé et Fournier, 1989)(1,21). Dans les bétons endommagés, ce granulat renferme du gel calco-silico-alcalin sous forme de veinules à l'intérieur des particules. On retrouve du gel dans les pores et les fissures de la pâte de ciment et à la surface des structures.

B) Le granulat de Sherbrooke:

Le granulat de Sherbrooke est un schiste vert chloriteux constitué en majeure partie de particules de métabasalte. Il contient des petits grains de quartz, des feldspaths, de la chlorite, de la séricite et autres minéraux mineurs. La principale phase réactive de cette roche est probablement le microquartz quoiqu'on classe habituellement cette pierre dans la catégorie de réactivité du type alcalis-silice/silicates. Grattan-Bellew (1982)(24) a attribué la réactivité de ce granulat à des grains de quartz de 15-60 µm présentant une extinction ondulante au microscope optique polarisant.

La réactivité aux alcalis du granulat de Sherbrooke est de type périphérique interne, c'est-à-dire que l'attaque alcaline débute en périphérie puis progresse vers l'intérieur. Dans les bétons affectés, du gel peut être observé à l'interface pâte-granulat et dans le granulat lui-même. Une bordure de réaction se développe à la périphérie interne des particules. On retrouve également du gel dans les pores et les fissures de la pâte de ciment et à la surface externe des structures. Il semble que la réactivité de ce granulat se manifeste moins rapidement que celle des calcaires siliceux, mais à long terme (dix ans et plus), les expansions et la fissuration peuvent être importantes.

C) La syénite à néphéline de Saint-Hilaire (Québec):

Cette roche intrusive basique est à grain moyen à grossier et est constituée de cristaux enchevêtrés de feldspaths alcalins, de feldspathoïdes (néphéline) et de pyroxènes alcalins (aégyrine). Cette roche ne contient pas de quartz et est riche en minéraux alcalins. Nous avons utilisé cette pierre à titre de granulat non réactif aux alcalis dans des conditions normales d'essai. Toutefois, lors des essais à 80 °C dans une solution de NaOH 1N, de faibles pourcentages d'expansion ont tout de même été obtenus.

4. RÉSULTATS

4.1 Barres de mortier

Les figures 3 et 4 présentent les résultats obtenus pour les essais d'expansion et d'autoconfinement des éprouvettes de mortier. On observe que les expansions et les contraintes se développent après quelques jours et que la progression est rapide pour ce qui est des granulats réactifs. La syénite démontre une certaine réactivité qui demeure très faible. Après 14 jours, on observe quelques exsudations de produits blanchâtres à la surface des éprouvettes fabriquées avec le calcaire d'Ottawa et le schiste de Sherbrooke, mais aucune fissure n'est apparue.

C'est le granulat le plus expansif qui a développé le plus de contrainte, soit 0,76% d'expansion versus 6,5 MPa pour le calcaire d'Ottawa à 30 jours, et 0,46% d'expansion versus 4,25 MPa à 30 jours pour le schiste de Sherbrooke. Après environ 25 jours, des fissures longitudinales apparaissent dans les éprouvettes fabriquées avec le calcaire D'Ottawa et l'on note un début de flambage de celles-ci..

4.2 Prismes de béton

La figure 5 présente les résultats obtenus pour les essais d'autoconfinement des éprouvettes de béton. On observe que les contraintes prennent beaucoup plus de temps à se manifester que dans le cas des barres de mortier. Après environ 5 jours, seul le granulat Spratt démontre une contrainte positive.

5. CONCLUSION

L'objectif de la phase 1 de cette étude a été pleinement atteint. Nous avons fabriqué des montages et développé une technique d'essai qui permettent de mesurer de façon rapide et fiable les contraintes générées par les réactions alcalis-granulats.

Les résultats initiaux de la phase 2 concernant les essais avec les barres de mortier sont très encourageants. Les résultats obtenus, ont confirmé que:

1. Les réactions alcalis-granulats peuvent générer des expansions libres et des contraintes d'autoconfinement importantes, soit plus de 6 MPa en confinement uniaxial.

2. L'utilisation de barres de mortier à 80 °C dans une solution de NaOH 1N permet d'obtenir des résultats d'autoconfinement en peu de temps, comme pour les expansions libres. D'après les résultats obtenus, les granulats qui démontrent le plus d'expansion libre génèrent les plus grandes contraintes.

6. REMERCIEMENTS

Ce projet a été financé par le Centre canadien de la technologie et de l'énergie (CANMET). Les auteurs remercient M. Georges Carette pour son dévouement et sa coliaboration. Les auteurs tiennent à faire mention de la contribution très appréciée de MM. Denis Fortier, Patrice Bélanger et René Phaneuf.

7. BIBLIOGRAPHIE

1- Durand, B., "Le rôle des additifs minéraux dans les réactions alcalis-granulats". Mémoire de maîtrise, École Polytechnique de Montréal, Québec (Canada), 199 p., 1986.

2 - Dent-Glasser, L.S. et Kataoka, N., "The Chemistry of Alkali-Aggregate Reaction". Cement and Concrete Research, vol. 11, pp. 1-9, 1981.

3- Dolar-Mantuani, L., "Handbook of Concrete Aggregate- A Petrographic and Technical Evaluation, éd. Noyes Publications, N.J., U.S.A., 345 p. 1983.

4- Swenson, E.G. et Gillott, J.E., "Characteristics of Kingston Carbonate Rock Reaction". Highway Research Board, Bulletin 275, pp. 18-31, 1960.

5- Swenson, E.G. et Gillott, J.E., "Alkali-Carbonate Rock Reaction". Highway Research Record 45, pp. 21-40, 1964.

6- Rogers, C.A., "êvaluation of the Potential for Expansion and Cracking of Concrete Caused by the Alkali-Carbonate Reaction". Cement, Concrete and Aggregates, vol. 8, no 1, pp. 13-23, 1986.

7- Albert, P. et Raphaël, S., "Alkali-Silica Reactivity in the Beauharnois Powerhouses, Beauharnois". Comptes rendus de la 7e conférence internationale sur les réactions alcalis-granulats dans le béton, Ottawa (Canada), Noyes Publications, P.E. Grattan-Bellew éditeur, pp. 10-16, 1987.

8- Thompson, G.A., "Alkali Aggregate Reactivity Remedial Measures Mactaquac Intake Structures". Presented at the International Workshop on Alkali-Aggregate Reaction in Concrete, Halifax (Canada), 20 p., 1990.

9- Hobbs, D.W., "Influence of Applied Stress and the Effect on the Mechanical Properties of Concrete" dans Alkali-Silica Reaction in Concrete, éd. Thomas Thelford, Londre, Chap. 3, pp. 56-72, 1988.

10- Moore, A.E., "An attempt to Predict the Maximum Forces that Could Be Generated by Alkali-Silica Reaction". Comptes rendus de la 4e conférence internationale sur les réactions alcalis-granulats dans le béton, Purdue (USA), pp. 363-365, 1978.

11- Diamond, S., "ASR - Another Look at Mechanisms". Comptes rendus de la 8e conférence internationale sur les réactions alcalis-granulats dans le béton, Kyoto (Japon), pp. 83-94, 1989.

12- Struble, L.S. et Diamond, S., "Swell Properties of Synthetic Alkali Aggregate Reactions". Comptes rendus de la 7e conférence internationale sur les réactions alcalis-granulats dans le béton, Ottawa (Canada), Noyes Publications, P.E. Grattan-Bellew éditeur, p. 446, 1981.

13- McGowan, J.K. et Vivian, H.F., "Studies in Cement-Aggregate Reaction, XX111. The Effect of Superincumbent Load of Mortar Bar Expansion". Australian Journal of Applied Science, pp. 94-97, 1954

14- Houde, J., Bérard, J. et Prézeau, A., "Étude de l'effet des contraintes et des gradients d'humidité sur les réactions alcalis-granulats", Rapport final présenté à Hydro-Québec, 38 p., 1987.

15- Rivest, M., Service structure et mécanique, direction équipement de production, Hydro-Québec, Place Dupuis, 855 Ste-Catherine Est, H2L 4P5, communication personnelle, 1990.

16- Seno, Y. et Kobayashi, K., "Expansion Properties of Mortars and Variations in Components of Pore Solutions Due to Alkali-Aggregate Reaction". Comptes rendus de la 8e conférence internationale sur les réactions alcalis-granulats dans le béton, Kyoto (Japon), pp. 141-146, 1989.

17- Clergue, C. et Corneille, A., "Search to a New, Rapid and Reliable Test Method, With a View to Evaluate the Damage Risk in Concrete, Due to Alkali-Aggregate Reaction". Comptes rendus de la 8e conférence internationale sur les réactions alcalis-granulats dans le béton, Kyoto (Japon), pp. 397-402, 1989.

18- Wood, J.G.M., Young, J.S. et Ward, D.E., "The Structural Effects of Alkali-Aggregate Reaction on Reinforced Concrete". Comptes rendus de la 7e conférence

internationale sur les réactions alcalis-granulats dans le béton, Ottawa (Canada), Noyes Publications, P.E. Grattan-Bellew éditeur, pp. 157-162.

19- Durand, B. et Bérard, J., "Use of Gel Composition as a Criterion for Diagnosis of Alkali-Aggregate Reactivity in Concrete Containing Siliceous Limestone Aggregate". Matériaux et constructions, vol. 20, pp. 39-43, 1987.

20- Clark, T.H. et Globensky Y., "Région de Trois-Rivières". R.G. 164, ministère des Richesses Naturelles du Québec, 98 p. + cartes, 1976.

21- Bérubé, M.A. et Fournier, B., "Alkali-Reactivity Potential of Carbonate Rocks from the St. Lawrence Lowlands (Quebec, Canada)". Comptes rendus de la 8e conférence internationale sur les réactions alcalis-granulats dans le béton, Kyoto (Japon), pp. 363-368, 1989.

22- Norme ASTM C227-87, "Potential Reactivity of Cement Aggregate Combinations (Mortar-Bar Method)", American Society for Testing and Materials, Pa. U.S.A. Concrete and Mineral Aggregates, 999 p., 1987.

23- Oberholster, R.E. et Davies, G., "An Accelerated Method for Testing the Potential Alkali Reactivity of Siliceous Aggregates". Cement and Concrete Research, vol. 16, pp. 181-189, 1986.

24- Grattan-Bellew, P.E., "Preliminary Report on Potential Alkali-Aggregate Reactivity of Aggregate from the Hebert Quarry", Sherbrooke, Quebec. NRCC, 8 p., 1982.

25- Fujii, M, Kobayashi, K., Kojima, T. et Meahara, H., "The Static and Dynamic Behavior of Reinforced Concrete Beams with Cracking Due to Alkali-Silica Reactivity". Comptes rendus de la 7e conférence internationale sur les réactions alcalis-granulats dans le béton, Ottawa (Canada), Noyes Publications, P.E. Grattan-Bellew éditeur, pp. 126-130, 1987.

26- Durand, B., "Contrôle des réactions alcalis-granulats par l'utilisation des ajouts minéraux", Ph.D. Thesis, Mineralogical Engineering dept., École Polytechnique, Montréal, Québec, Canada, 310 p., 1988

Tableau 1 - Revue des études sur les contraintes associées aux réactions alcalis-granulats

Auteur(s)	Type d'essai (temp.) (humid.)	Type d'échantillon	Granulat	Contraintes (Mpa)
Moore (1978),10 Diamond(1989) ,11	Données physico-chimiques	-	-	45-140
Diamond(1989) ,11	Estimé	Béton		6-7
Struble et Diamond(1981),12	Cellule osmotique	Gels synthétiques	-	10-11
McGowan et Vivian (1954), 13	Autoconfinement uniaxial 20°C,100% R.H.	Barres de mortier	Opale	0,35
Hobbs (1988),9	Autoconfinement uniaxial 20°C,100% R.H.	Prismes de béton	Opale	4
Houde et al, 1987, 14	Autoconfinement uniaxial 38°C	Béton dans tubes d'acier	Calcaire Spratt	0,24
Fujii et al, (1986), 25	Autoconfinement uniaxial 40°C,100% R.H.	Prismes de béton	Andésite	4
Seno et Kobayashi (1989), 16	Autoconfinement uniaxial 40°C,100% R.H.	Mortier dans tubes	Andésite vitreuse	11,8
Wood et al, (1989), 18	Autoconfinement par armature	Cylindres de béton	-	13,5
Clergue et Corneille(1989), 17	Autoconfinement triaxial	Mortier	Calcaire Spratt	1
Hydro-Québec, (1990), 15	Autoconfinement triaxial in situ	Béton de barrage	Ortho-Quartzite	2
Durand et al. (1991) (cette étude)	Autoconfinement uniaxial 80°C, NaOH 1N	Prismes de mortier et de béton	3 granulats	6-7

Tableau 2: Composition chimique des matériaux

	Ciment Lafarge T10	Ciment Ciment Québec T10	Calcaire Spratt (Ont.)	Schiste à chlorite (Qc)
SiO_2	21.83	20.3	9.23	47.8
Al_2O_3	4.10	5.6	0.82	15.43
Fe_2O_3	2.89	2.5	0.28	9.73
FeO total	-		0.20	6.81
CaO	61.29	62.8	47.6	12.41
MgO	2.66	2.8	1.46	3.9
Na_2O	0.36	0.33	0.04	1.98
K_2O	0.85	0.87	0.15	0.87
SO_3	3.24	0.9	0.11	0.04
MnO	0.05	-	0.50	0.30
TiO_2	0.20	-	0.001	0.38
P_2O_5	0.21	-	0.34	0.02
Perte au feu	2.22	0.9	39.1	7.42
Total	99.9	97.0	99.6	100.4
% résidus insolubles	-	0.3	12.81	70.12

Tableau 3: Caractéristiques des mélanges des mortiers

CIMENT:	**LAFARGE TYPE 10**
ADDITIF CHIMIQUE:	**NaOH**
EAU:	**DISTILLÉE**
DOSAGE (POUR QUATRE BARRES)	
-CIMENT:	**300 g**
-NaOH:	**1.35 g**
-EAU:	**135 ml**
GRANULAT:	**tamis 8 (4.75 mm) = 67.5 g**
	tamis 16 (2.36 mm) = 168.75 g
	tamis 30 (1.18 mm) = 168.75 g
	tamis 50 (600 µm) = 168.75 g
	tamis 100 (300 µm) = 101.25 g
DÉTAILS:	
- RAPPORT EAU-CIMENT:	**0.45**
-RAPPORT CIMENT-GRANULAT:	**0.44**
-AVEC L'AJOUT DE NaOH, LES ALCALIS PASSENT À 1.25% équiv.	
-LES PROCÉDURES DE LA NORME ASTM C 305 SONT SUIVIES LORS DU MÉLANGE	

Tableau 4: Caractéristiques des mélanges des bétons

CIMENT:	**CIMENT QUÉBEC TYPE 10**
ADDITIF CHIMIQUE:	**NaOH**
EAU:	**DISTILLÉE**
DOSAGE (PAR MÈTRE CUBE)	
-CIMENT:	**310 kg**
-GRANULAT:	**1200 kg**
-SABLE:	**792 kg**
-EAU:	**155 kg**
-RAPPORT EAU/CIMENT:	**0.5**
-RAPPORT SABLE/GRANULAT	**0.66**
-RAPPORT CIMENT/GRANULAT + SABLE	**0.16**
GRANULAT:	**tamis 20-14 mm = 33 %**
	tamis 14-10 mm = 33 %
	tamis 5-10 mm = 33 %
DÉTAILS:	
-AVEC L'AJOUT DE NaOH, LES ALCALIS PASSENT À 1.25% équiv.	
-LA NORME UTILISÉE EST LA NORME CSA A23.2-14A	

Note: Le sable utilisé pour les prismes de béton est un sable de type granitique provenant de la région de St-Félix de Valois (Lanaudière, Qc). Ce sable est classé non-réactif aux alcalis lors d'essai ASTM C 227 (Durand, 26)

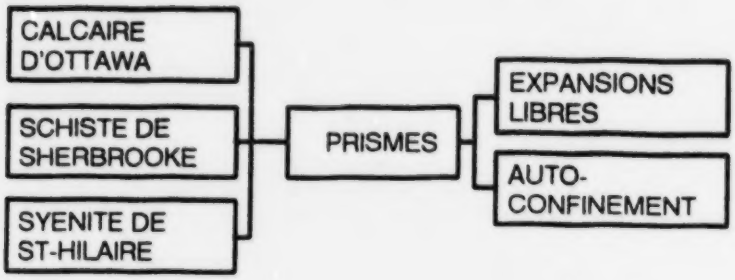

Fig. 1: Programme des essais

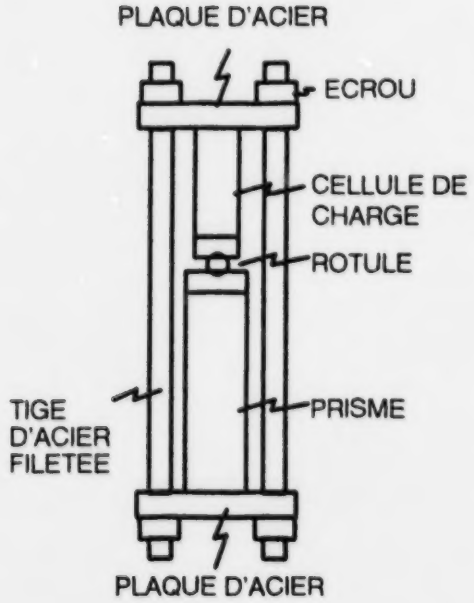

Fig. 2: Schéma du montage des essais d'autoconfinement

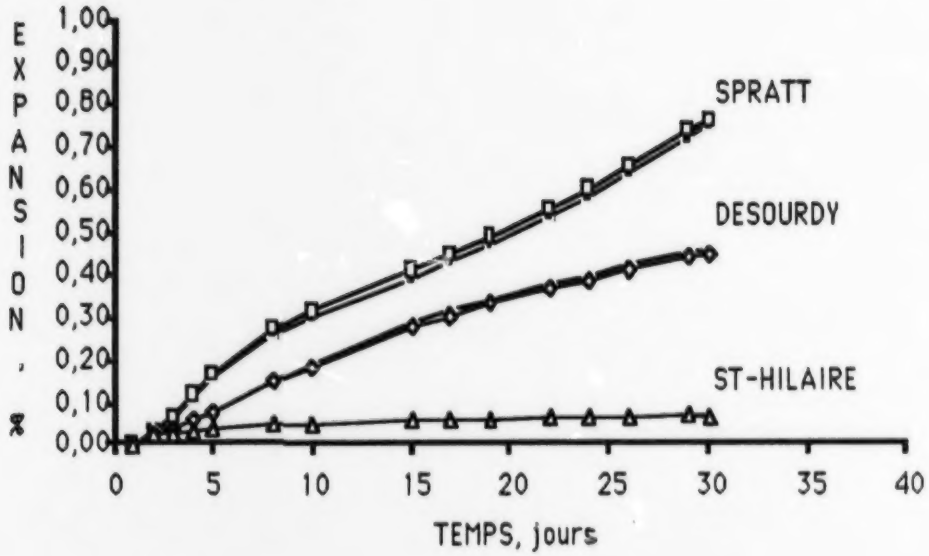

Fig. 3: Évolution des expansions libres des barres de mortier

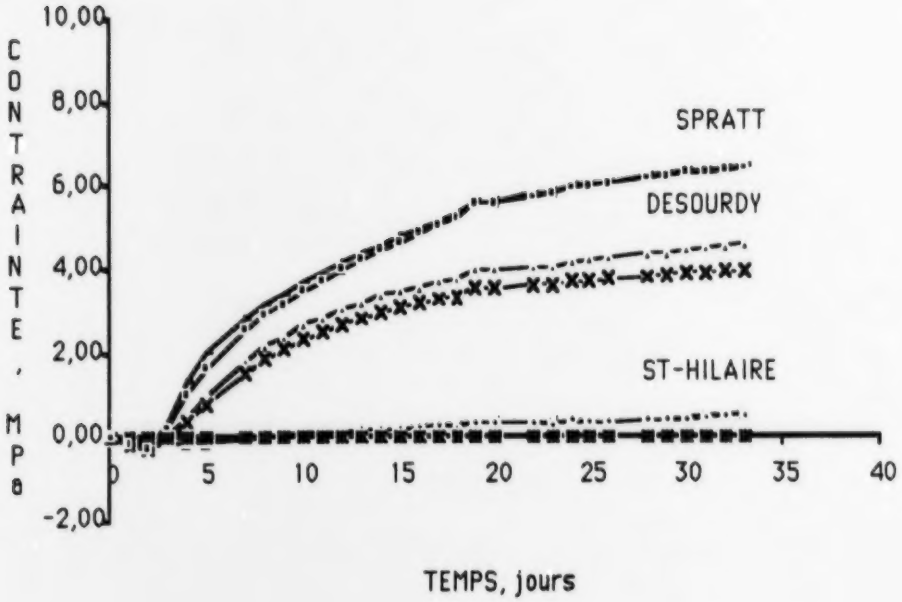

Fig. 4: Évolution des contraintes d'autoconfinement des barres de mortier

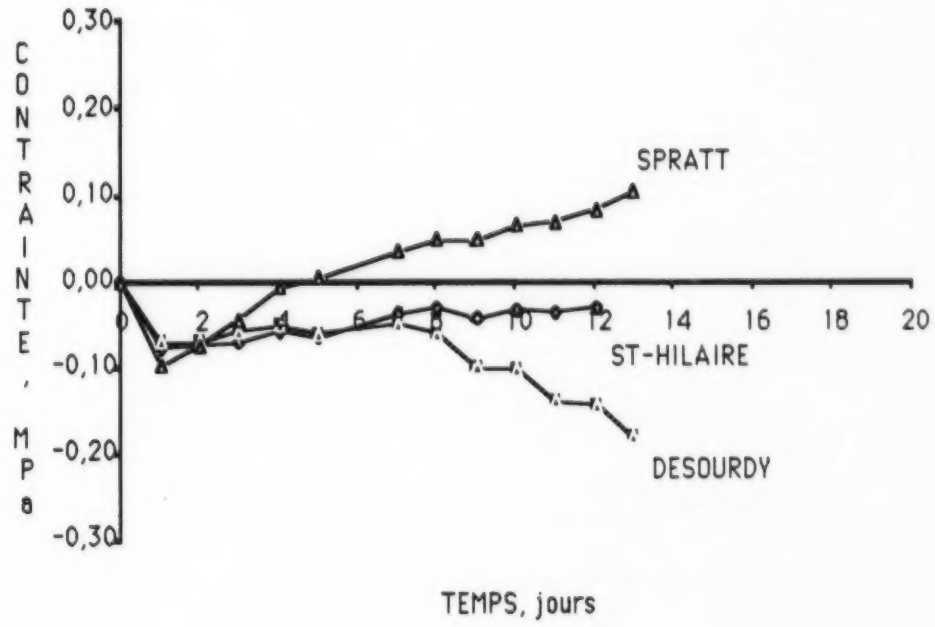

Fig. 5: Évolution des contraintes d'autoconfinement des prismes de béton

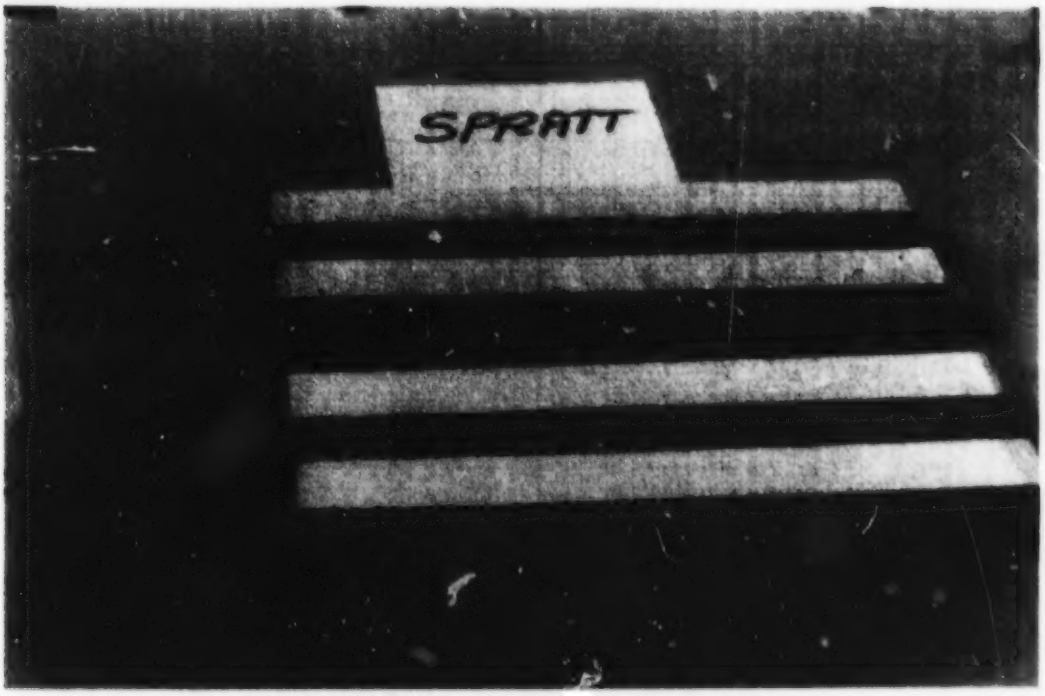

Fig. 6: Photographie des barres de mortier
(après 30 jours de cure à 80 °C dans une
solution de NaOH 1N)

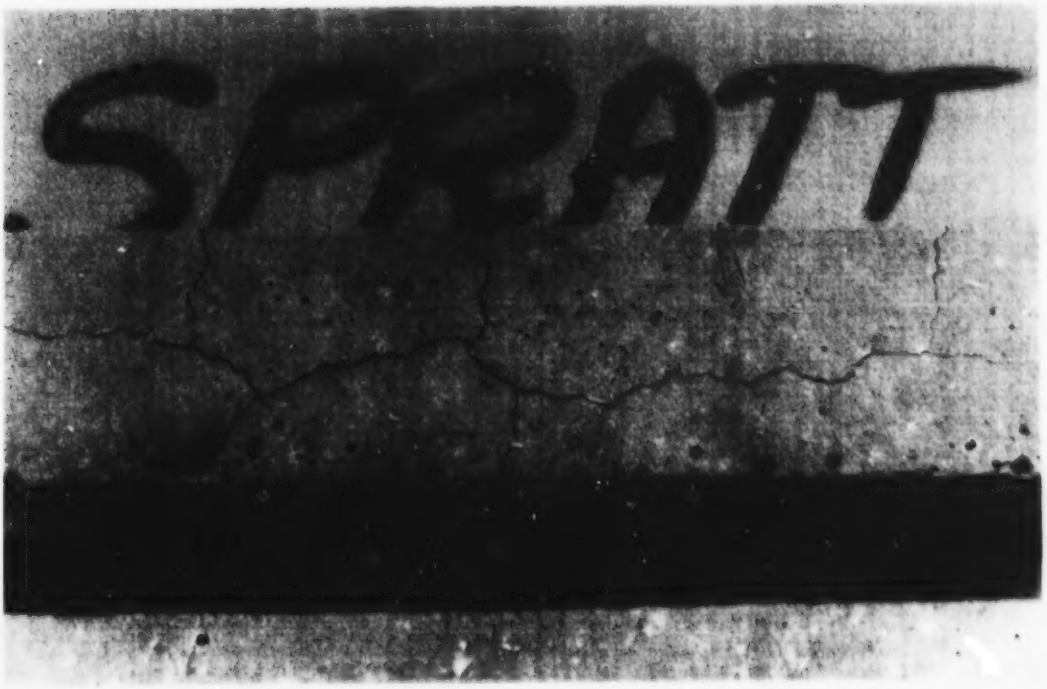

Fig. 7: Photographie des barres de mortier
(après 30 jours de cure à 80 °C dans une
solution de NaOH 1N)

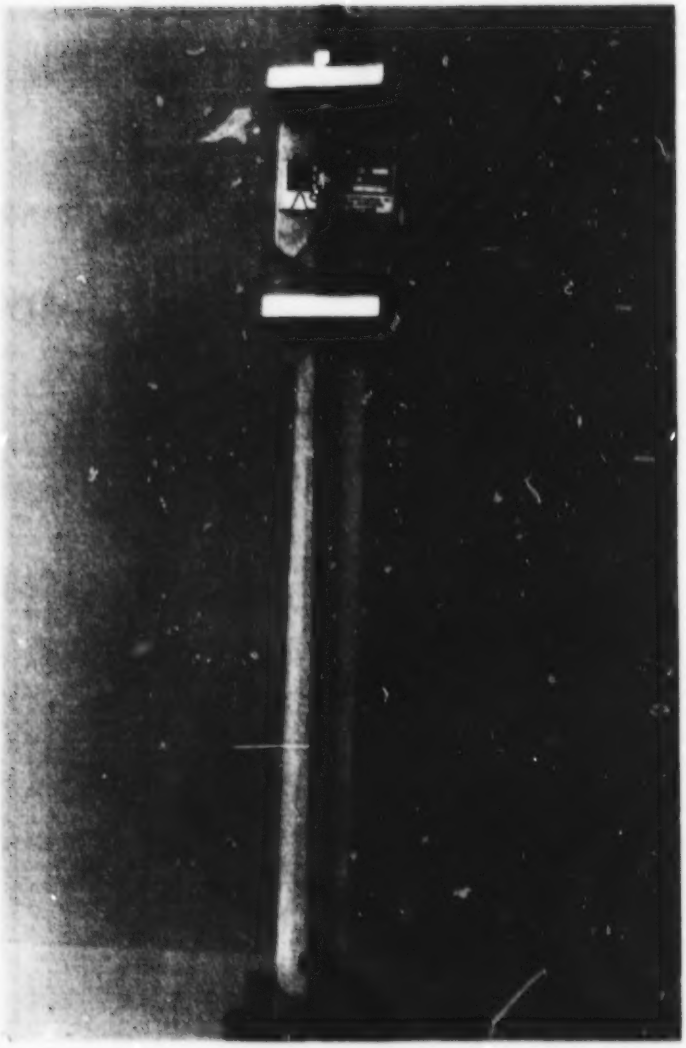

Fig. 8: Photographie des montages pour les essais d'autoconfinement des barres de mortier (essai à 80 °C dans une solution de NaOH 1N)

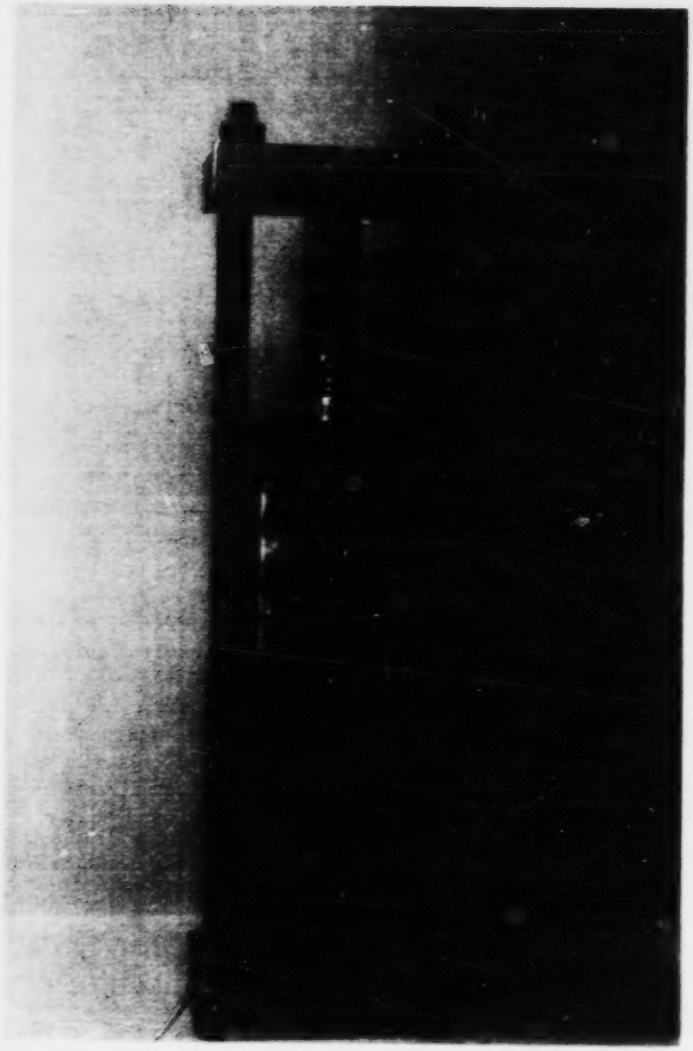

Fig. 9: Photographie des montages pour les essais d'autoconfinement des prismes de béton (essai à 80 °C dans une solution de NaOH 1N)

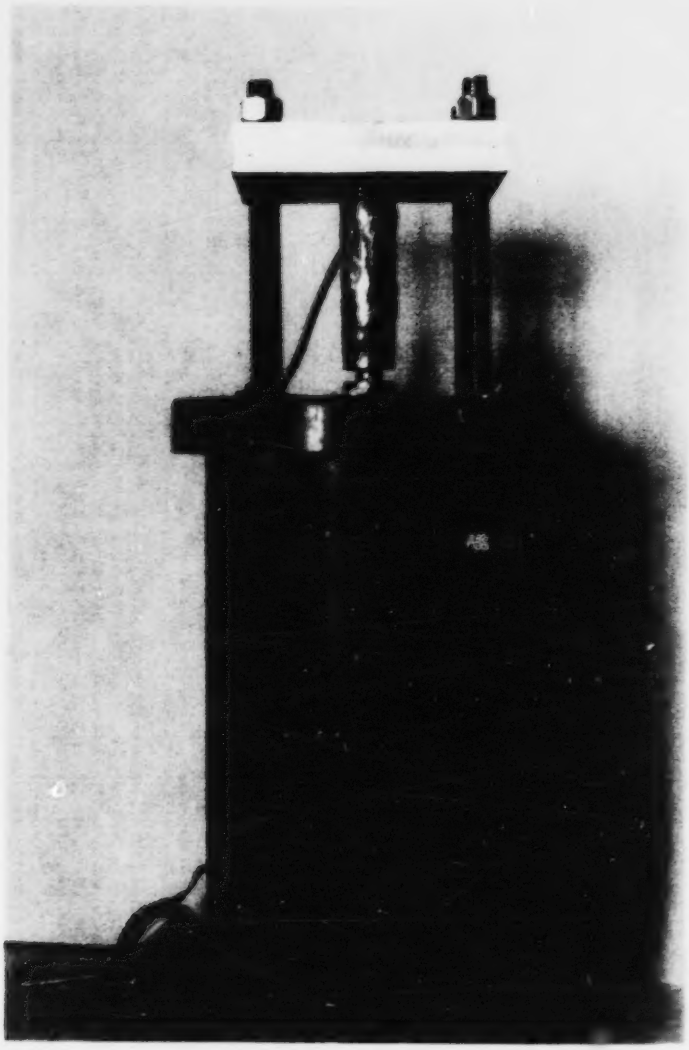

Fig. 10: Photographie des montages et des contenant
pour les essais d'autoconfinement
des prismes de béton
(essai à 80 °C dans une solution de NaOH 1N)

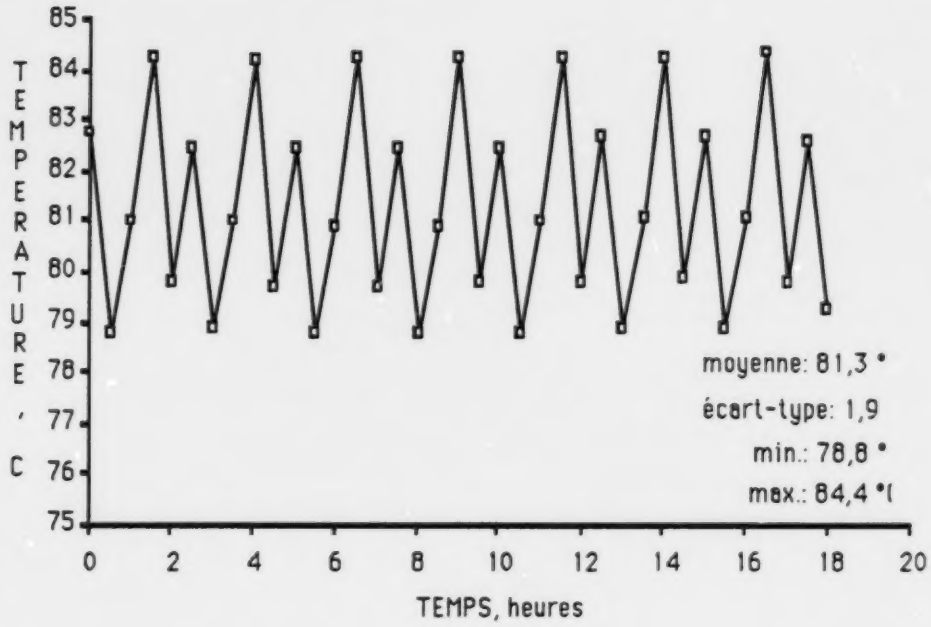

Fig. 11: Variation de la température de la cuve d'essai

8. ANNEXE

Tableau 5: Données des essais d'expansion libre
(Barres de mortier, Spratt)

ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTREAL
RÉSULTAT POUR L'ESSAI DES BARRES DE MORTIER

ESSAIS D'EXPANSION LIBRE

REQUERANT : BENOIT DURAND
CURE : 80 C, NaOH 1N
DIMENSION DES BARRES : 645.16 mm^2
LONGUEUR: 254 mm

	SPRATT-03-04			
njour	S3 (mm)	dL (%)	S4 (mm)	dL (%)
initiale	8,270		8,398	
1	8,270	0,000	8,398	0,000
2	8,342	0,028	8,475	0,030
3	8,433	0,064	8,566	0,066
4	8,566	0,117	8,708	0,122
5	8,683	0,163	8,828	0,169
8	8,936	0,262	9,097	0,275
10	9,045	0,305	9,213	0,321
15	9,277	0,396	9,456	0,417
17	9,371	0,433	9,547	0,452
19	9,470	0,472	9,644	0,491
22	9,637	0,538	9,810	0,556
24	9,766	0,589	9,939	0,607
26	9,903	0,643	10,072	0,659
29	10,115	0,726	10,281	0,741
30	10,179	0,752	10,345	0,767

Tableau 6: Données des essais d'expansion libre
(Barres de mortier, Désourdy)

ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTREAL
RÉSULTAT POUR L'ESSAI DES BARRES DE MORTIER

ESSAIS D'EXPANSION LIBRE

REQUERANT : BENOIT DURAND
CURE : 80 C, NaOH 1N
DIMENSION DES BARRES : 645.16 mm^2
LONGUEUR: 254 mm

	DESOURDY-03-04			
njour	D3 (mm)	dL (%)	D4 (mm)	dL (%)
initiale	8,534		8,462	
1	8,534	0,000	8,462	0,000
2	8,609	0,030	8,534	0,028
3	8,638	0,041	8,565	0,041
4	8,687	0,060	8,614	0,060
5	8,740	0,081	8,668	0,081
8	8,925	0,154	8,845	0,151
10	9,028	0,194	8,945	0,190
15	9,279	0,293	9,186	0,285
17	9,342	0,318	9,248	0,309
19	9,406	0,343	9,310	0,334
22	9,505	0,382	9,404	0,371
24	9,557	0,403	9,455	0,391
26	9,613	0,425	9,507	0,411
29	9,695	0,457	9,59	0,444
30	9,714	0,465	9,608	0,451

Tableau 7: Données des essais d'expansion libre
(Barres de mortier, St-Hilaire)

ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTREAL
RÉSULTAT POUR L'ESSAI DES BARRES DE MORTIER

ESSAIS D'EXPANSION LIBRE

REQUERANT : BENOIT DURAND
CURE : 80 C, NaOH 1N
DIMENSION DES BARRES : 645.16 mm^2
LONGUEUR: 254 mm

ST-HILAIRE-03-04

njour	H3 (mm)	dL (%)	H4 (mm)	dL (%)
initiale	8,855		8,83	
1	8,855	0,000	8,830	0,000
2	8,919	0,025	8,895	0,026
3	8,926	0,028	8,899	0,027
4	8,938	0,033	8,915	0,033
5	8,953	0,039	8,928	0,039
8	8,975	0,047	8,952	0,048
10	8,983	0,050	8,960	0,051
15	9,009	0,061	8,981	0,059
17	9,014	0,063	8,986	0,061
19	9,019	0,065	8,990	0,063
22	9,026	0,067	8,998	0,066
24	9,030	0,069	9,001	0,067
26	9,032	0,070	9,005	0,069
29	9,038	0,072	9,011	0,071
30	9,037	0,072	9,01	0,071

Tableau 8: Données des essais d'autoconfinement
(Barres de mortier, 3 granulats)

ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTREAL
RÉSULTAT POUR L'ESSAI DES BARRES DE MORTIER

ESSAIS D'AUTOCONFINEMENT
REQUERANT : BENOIT DURAND
CURE : 80 C, NaOH 1N
DIMENSION DES BARRES : 645.16 mm^2
LONGUEUR: 254 mm

Jours	ST-HILAIR 1 (MPa)	ST-HILAIR 2 (MPa)	DESOURD` 1 (MPa)	DESOURD` 2 (MPa)	SPRATT 1 (MPa)	SPRATT 2 (MPa)
0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
1	-0,08	-0,06	-0,11	-0,17	-0,18	-0,16
2	-0,22	-0,17	-0,20	-0,29	-0,28	-0,30
3	-0,19	-0,13	0,02	-0,04	0,37	0,21
4	-0,17	-0,11	0,46	0,36	1,31	0,99
5	-0,14	-0,08	0,96	0,79	1,98	1,62
7	-0,05	0,00	1,82	1,53	2,83	2,54
8	0,01	0,04	2,15	1,83	3,15	2,90
9	-0,02	0,03	2,37	2,06	3,37	3,16
10	0,08	0,10	2,67	2,33	3,66	3,47
11	0,05	0,08	2,83	2,50	3,87	3,70
12	0,12	0,13	3,05	2,68	4,15	3,99
13	0,16	0,17	3,21	2,84	4,35	4,21
14	0,18	0,18	3,36	2,98	4,54	4,44
15	0,18	0,19	3,47	3,10	4,77	4,65
16	0,23	0,23	3,59	3,20	4,96	4,85
17	0,25	0,25	3,69	3,29	5,13	5,03
18	0,25	0,24	3,75	3,35	5,27	5,18
19	0,32	0,30	4,00	3,57	5,62	5,54
20	0,32	0,30	3,97	3,54	5,62	5,55
22	0,30	0,29	4,04	3,61	5,78	5,73
23	0,29	0,28	4,05	3,63	5,83	5,78
24	0,37	0,39	4,19	3,72	5,98	5,93
25	0,38	0,35	4,21	3,72	6,02	5,97
26	0,37	0,36	4,25	3,76	6,09	6,04
28	0,42	0,40	4,36	3,82	6,20	6,16
29	0,40	0,39	4,37	3,84	6,25	6,20
30	0,46	0,42	4,44	3,89	6,33	6,29
31	0,50	0,45	4,48	3,91	6,38	6,32
32	0,51	0,47	4,52	3,92	6,41	6,35
33	0,53	0,47	4,57	3,95	6,46	6,41

Tableau 9: Données des essais d'autoconfinement
(Barres de mortier et prismes de béton, 3 granulats)

ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTREAL
RÉSULTAT POUR L'ESSAI DES BARRES DE MORTIER ET PRISMES DE BÉTON
ESSAIS D'AUTOCONFINEMENT

REQUERANT : BENOIT DURAND
CURE : 80 C, NaOH 1N
DIMENSION : 25.4 X 25.4 mm^2 (mortier)
76X102 mm^2 (Beton)

Conversion en MPa = (Ti-T0)*F.G./Aire

avec F.G.= 1.14 (mortier, calibration en N)
= 0.0108 (AG3, calibration en KN)
= 0.0107 (AG4, calibration en KN)
= 0.0109 (AG5, calibration en KN)

	Béton			Mortier (triplicata)		
Jours	ST-HILAIRE AG3 (MPa)	DESOURDY AG4 (MPa)	SPRATT AG5 (MPa)	ST-HILAIRE 3 (MPa)	DESOURDY 3 (MPa)	SPRATT 3 (MPa)
0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
1	-0,08	-0,07	-0,10	-0,13	-0,10	0,05
2	-0,08	-0,07	-0,08	-0,08	0,03	1,08
3	-0,07	-0,06	-0,04	-0,04	0,25	2,34
4	-0,06	-0,05	-0,01	0,03	0,63	3,48
5	-0,07	-0,06	0,00	0,06	0,83	3,81
7	-0,04	-0,05	0,03	0,11	1,08	4,15
8	-0,03	-0,06	0,05	0,13	1,29	4,35
9	-0,04	-0,10	0,05	0,14	1,54	4,52
10	-0,03	-0,10	0,06	0,17	1,78	4,70
11	-0,04	-0,14	0,07	0,18	2,06	4,89
12	-0,03	-0,14	0,08	0,20	2,26	5,06
13		-0,18	0,10	0,23	2,46	5,21

Tableau 10: Variation de la température
de la cuve d'essai à 80 °C

ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTREAL
TEMPÉRATURE DE LA CUVE EN FONCTION DU TEMPS

ESSAIS D'AUTOCONFINEMENT ET D'EXPANSION LIBRE
REQUERANT : BENOIT DURAND
CURE : 80 C, NaOH 1N

Temps (hres)	temperature (Celsius)	Temps (hres)	temperature (Celsius)
0.0	82.8	12.0	79.8
0.5	78.8	12.5	82.7
1.0	81.0	13.0	78.9
1.5	84.3	13.5	81.1
2.0	79.8	14.0	84.3
2.5	82.5	14.5	79.9
3.0	78.9	15.0	82.7
3.5	81.0	15.5	78.9
4.0	84.2	16.0	81.1
4.5	79.7	16.5	84.4
5.0	82.5	17.0	79.8
5.5	78.8	17.5	82.6
6.0	80.9	18.0	79.3
6.5	84.3		
7.0	79.7	Moyenne	59.1
7.5	82.5	ecart-type	31.3
8.0	78.8	Min	12.0
8.5	80.9	Max	84.4
9.0	84.3		
9.5	79.8		
10.0	82.5		
10.5	78.8		
11.0	81.0		
11.5	84.3		

Tableau 11: Données techniques des cellules de charge commerciales utilisées pour les essais sur barres de mortier

APPLIED STRESS TECHNOLOGY INC.

Box 542, Minden, Ontario K0M 2K0 CANADA

LOAD CELL CALIBRATION CERTIFICATE

MODEL: SST-700-1K SERIAL NUMBER: 90100
CAPACITY: 1,000 lbs FSO: 19.98 mV

SENSITIVITY:	1.998 mV/V	ZERO BALANCE:	0.5% FS
NON-REPEATABILITY:	0.03% FS	NON-LINEARITY:	0.03% FS
EXCITATION: 10 VDC. MAX. 15 VDC		SAFE OVERLOAD:	150%
HYSTERESIS:	0.03%	TEMP. COMP:	-15 to +45 C.
INSULATION RES.:	> 50 MOhms		

WIRING

+	EXCITATION:	RED	+	SIGNAL:	GREEN
-	EXCITATION:	BLACK	-	SIGNAL:	WHITE

DATE:

BY: